

## EL KARREN LITORAL A LES ILLES BALEARS

Lluís GÓMEZ-PUJOL<sup>1,2,3</sup>, Joan J. FORNÓS<sup>3</sup> i Francesc POMAR<sup>3</sup>

### Abstract

Coastal exokarstic landforms are quite common features at the Balearic Islands, owing to the presence of extensive coastal limestone outcrops as well as to the suitable hydrodynamic and bioclimatic environment that promotes the development of karst processes. Pinnacles, basin pools, pits and notches, among others, can be seen, especially in the south and southeastern coast of Mallorca, the southern coast of Menorca and all around Formentera. Otherwise the presence of coastal karren in northern Mallorca, Menorca and Eivissa is less prominent due to lithology. Coastal karren at Balearic Islands are quite remarkable because of their morphological variety and occurrence on different rock types, but also as a subject of study on the effect of hydrodynamic gradients and the precipitation and temperature settings or on the biological influence in karst processes. Coastal karren together with plunging cliffs and Quaternary aeolianites exploited as rock quarries are the foremost representative feature of Balearic Islands coastline.

### Resum

Les formes exocàrstiques típiques dels ambients costaners estan molt ben representades a les Illes Balears, a causa del predomini de les roques calcàries al llarg de la seva línia de costa i també arran de les condicions hidrodinàmiques i bioclimàtiques que han contribuït a la seva carstificació. Pinacles, cocons, microalvéols i entalladures, entre d'altres, són presents especialment al Llevant i Migjorn de Mallorca, al Migjorn de Menorca i a Formentera. La seva presència és menys abassegadora per qüestions litològiques al nord de Mallorca i Menorca i en el retall de les costes eivissenques. El desenvolupament d'aquest particular micromodelat sobre rocams de diferents propietats i edats, exposicions a l'onatge o zones amb diferent pluviositat i temperatura, ofereix la possibilitat d'estudiar els gradients hidrodinàmics i el control litològic, a més a més de la influència biològica, sobre la configuració i tipologia dels conjunts de karren litoral. Juntament amb els penya-segats estructurals i les dunes plio-quaternàries adossades a la línia de costa i la seva explotació en forma de pedreres de marès, el karren litoral és un dels trets més representatius i característics del litoral de les Balears.

### Resumen

Las formas exokársticas típicas del medio costero están bien representadas en las Islas Baleares como consecuencia del predominio de los roquederos calcáreos a lo largo de su línea de costa, así como de las condiciones hidrodinámicas y bioclimáticas que han contribuido a su karstificación. Pináculos, pozas, microalvéolos y entalladuras, entre otros, aparecen especialmente en el S y SE de Mallorca, el S de Menorca y el conjunto de Formentera. Su presencia en las costas norte de Mallorca y Menorca por cuestiones de litología es de menor envergadura y aparecen también a retazos en la costa de Eivissa. El desarrollo de este micromodelado particular sobre roquederos de diferentes propiedades y edades, exposición al oleaje y zonas con diferente pluviosidad y temperatura, ofrece la posibilidad de estudiar los gradientes hidrodinámicos y el control litológico, así como la influencia biológica, sobre la organización y tipología de conjuntos de karren litoral. Junto con los acantilados estructurales, las dunas cuaternarias adosadas a la línea de costa y su explotación como canteras, el karren litoral es uno de los elementos más representativos y característicos del litoral de las Baleares.

## Introducció

El micromodelat de les costes rocoses carbonatades resulta de la interacció entre diferents processos i agents, motiu pel qual les formes que s'hi observen no sempre tenen una naturalesa estrictament càrstica en

l'accepció clàssica d'aquest mot (JENNINGS, 1985). Així doncs, sota l'epígraf de karren litoral, karren costaner o a tot estirar karren marí, s'acostuma a agrupar el conjunt de microformes d'alteració (de l'ordre mil·limètric al mètric) que apareixen de la zona interlitoral a la supralitoral de les costes rocoses, i que es perllonguen fins a l'àrea de declivi dels processos marins enfront dels pròpiament terrestres i en les quals la dissolució juga un paper important. Queden, doncs, fora d'aquesta definició, entre d'altres, formes com les marmites, les plataformes litorals o les construccions organògenes.

- 
- 1 IMEDEA (CSIC-UIB), Institut Mediterrani d'Estudis Avançats, Miquel Marqués 21, 07190 Esporles
  - 2 ICTS SOCIB, Balearic Islands Coastal Observing and Forecasting System, Parc Bit, Edifici Naorte, 07012 Palma
  - 3 Karst & Littoral Geomorphology Research Group, Universitat de les Illes Balears, Cra. Valldemossa km 7.5, 07012 Palma

Totes elles, tan estretament lligades als ambients que es consideren. No obstant això, treballs recents (FIOL *et al.*, 1996; MOSES, 2003; VILES, 1995) posen de manifest la importància dels agents biològics, des de cianobacteris a gastròpodes, en els processos d'alteració del rocam calcari, tot parlant de biocarst o de processos biocàrstics o fitocarst (VILES, 1988a). Aquesta situació és particularment important a les costes carbonatades on la superfície presenta un grau intens de colonització i on l'aportació d'aigua, tant per la pluja com per les onades, no pot ser menystinguda.

Les costes rocoses són característiques, per no dir dominants, del perímetre litoral de les Illes Balears. Estan associades a canvis bruscs de la batimetria i poques vegades la isòbata de -20 m es troba a distàncies majors de 500 m respecte de la línia de costa. La forma dels penya-segats està relacionada amb la disposició i característiques de les unitats morfoestructurals de cada illa, condicionades per l'estructuració neògena distensiva en forma de grans blocs aixecats i enfonsats (horsts i grabens). Els penya-segats aplomats són típics dels vessants marítims dels horsts, mentre que els grabens donen redós a albuferes i sistemes platja-duna (GÓMEZ-PUJOL *et al.*, 2007). Els relleus tabulars, adossats als principals horsts i grabens, estan delimitats per falles lístriques d'edat Miocè superior–Quaternari (GELABERT, 1998) que es tradueixen a la línia de costa en penya-segats verticals d'altures mitjanes i baixes. Així doncs, a mode d'instància, les costes rocoses de les Balears presenten perfils aplomats o composts tallats en materials del Paleozoic fins al Miocè superior (SERVERA, 1999; ROSSELLÓ, 2004; BALAGUER,

2007). L'alçària dels penya-segats varia, localment, de 3 a 30 m, i es perllonga mar endins entre 3 i 5 m. Als afloraments plegats, les plataformes litorals i el karren litoral apareixen a mode de pegats quan l'estructura i la litologia ho permeten (Fig. 1). Quan hi afloren les roques carbonatades del Miocè superior, els penya-segats presenten un perfil esglaonat relacionat, d'una banda, amb la disposició tabular i geometria dels estrats de les unitats del Miocè superior, així com de les seves propietats geomecàniques (POMAR & WARD, 1999; POMAR *et al.*, 2003) i, d'altra banda, amb les formes heretades d'antics nivells marins del Plistocè (BUTZER, 1962). El tram final d'aquests penya-segats, a tocar de la ribera, cau en vertical amb façanes de 3 a 30 m. Per la seva banda, les plataformes litorals, tot i que amb una distribució discontinua, són més freqüents als afloraments de materials postorogènics que no pas als plegats. De la mateixa manera, els conjunts o dispositius de karren litoral, són força comuns en els afloraments carbonatats del Miocè superior, així com a les eolianites quaternàries que s'hi adossen (Fig. 1).

En aquestes pàgines es procurarà aportar informacions sobre les característiques i l'origen del micromodelat de les costes rocoses calcàries de les Balears, després d'una breu revisió bibliogràfica dels coneixements disponibles i d'una descripció dels principals grups de formes que integren aquest tipus de modelat: pinacles, cocons o microalvèols entre d'altres... Juntament amb els comentaris referents a cada un, s'inclouran descripcions més detallades dels exemples de formes més representatius i dels cicles evolutius que contribueixen a explicar la seva configuració.

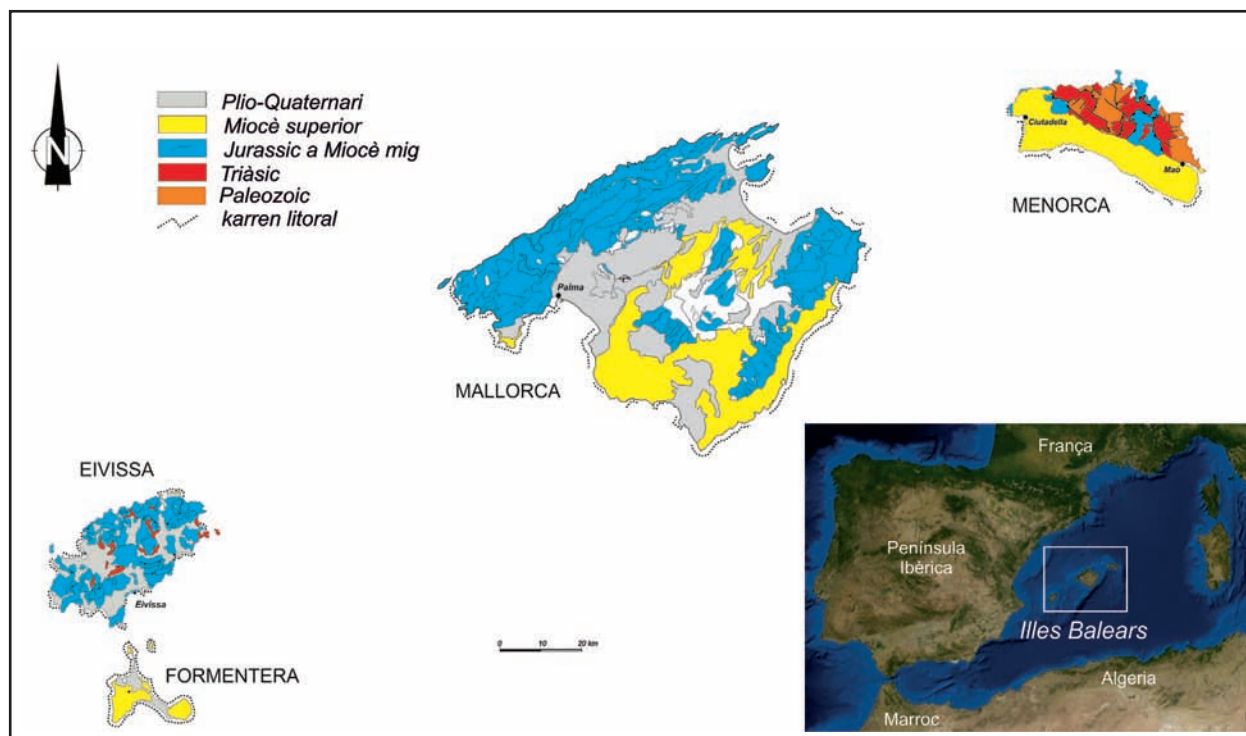


Figura 1: Croquis geològic i localització dels sectors de la costa amb abundants formes de karren litoral a les Illes Balears.

Figure 1: Location inset and geological sketch of Balearic Islands. Dotted line indicates coastline with conspicuous coastal karren features.



## Estat actual dels coneixements

L'estudi del micromodelat de les costes calcàries, tot i que no compta amb una tradició consolidada, no és pobre en contribucions. Des dels treballs de WENTWORTH (1939), un dels primers científics que aborden aquestes formes del relleu costaner, l'aproximació a l'estudi del karren litoral ha canviat significativament en els seus continguts i objectius (LUNDBERG, 2009). Així, n'hi ha que centren els seus objectius en la descripció de les formes i la seva organització espacial (EMERY, 1946; CORBEL, 1952; GUILCHER, 1953; DALONGEVILLE, 1977; MAZZANTI & PAREA, 1979; SANJAUME, 1985), mentre que d'altres dediquen els seus esforços a identificar i entendre els processos i els agents que operen a les costes carbonatades (FOLK *et al.*, 1973;

SCHNEIDER, 1976; TRUDGILL, 1976a i 1979; VILES *et al.*, 2000; LUNDBERG & LAURITZEN, 2002; MOSES, 2003; GÓMEZ-PUJOL & FORNÓS, 2009a; MYLROIE & MYLROIE, 2009).

A les Illes Balears, i en especial a Mallorca, el primer treball que considera el karren litoral és el de WALTER-LEVY *et al.* (1958). El seguirien observacions breus de BUTZER (1962), BUTZER & CUERDA (1962) i GINÉS (2000) en el marc dels seus treballs d'estratigrafia i geocronologia quaternària. El primer article que aborda, en exclusiva, aquest tipus de formes és el de ROSSELLÓ (1979), qui intenta avaluar la tipologia i l'organització de les formes, a la vegada que assaja de calcular-ne una taxa de denudació d'acord amb els treballs previs dels quaternaristes. Posteriorment, apareixen altres treballs que posen l'èmfasi en la relació entre les formes del karren litoral i els processos bioerosius (KELLETAT, 1980,

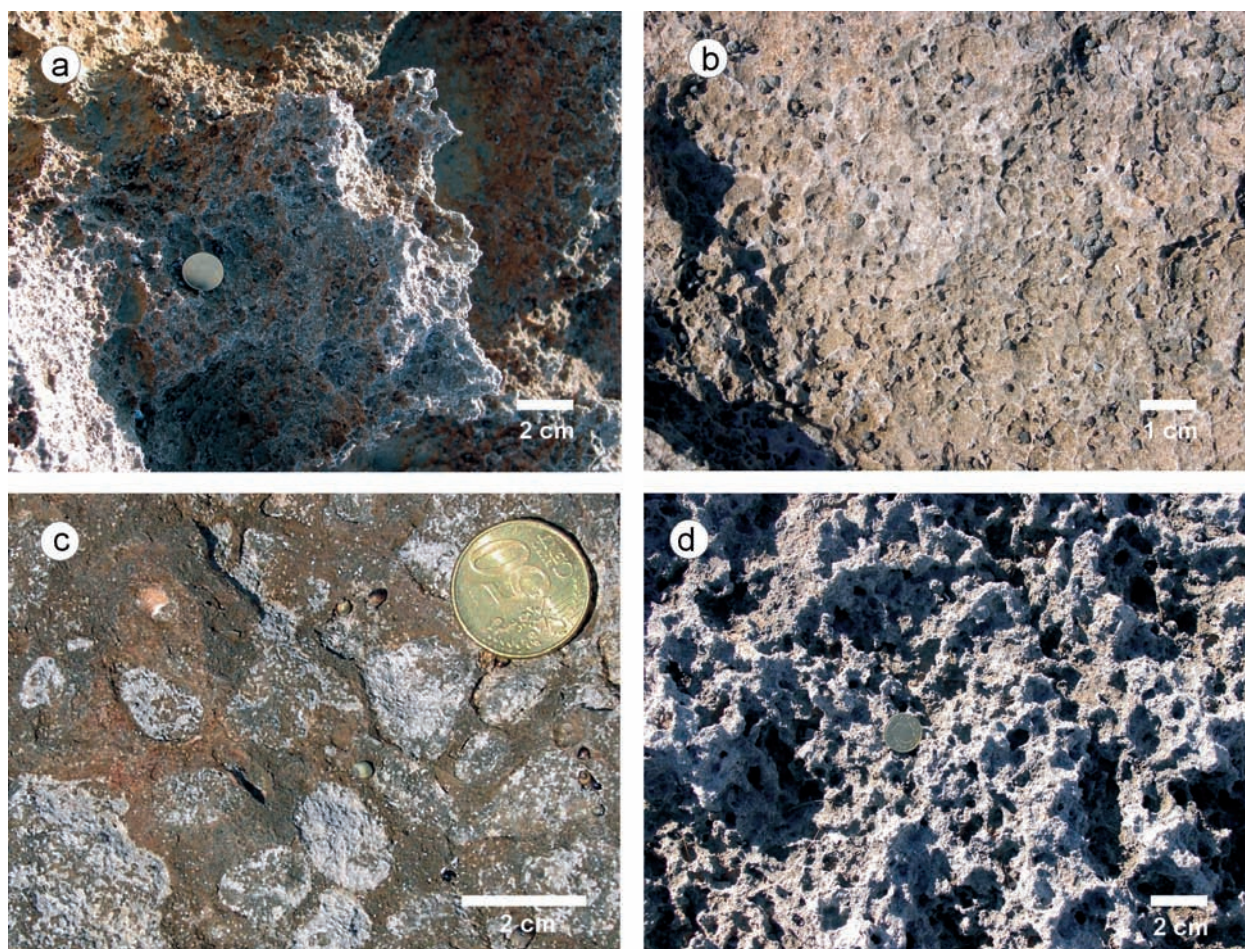


Figura 2: Alvèols i microalvèols. a i b) Superposició de microalvèols a sobre i dins les concavitats d'alvèols sobre les eolianites quaternàries de Cala Blava (Llucmajor, Mallorca) i Son Bauló (Santa Margalida, Mallorca). Molts dels microalvèols apareixen ocupats per exemplars de *Melaprhe neritoides* i *M. punctata*. c) Alvèols i microalvèols poc desenvolupats a les eolianites quaternàries de Cap Salines (Ses Salines, Mallorca). Es pot apreciar com a l'interior dels alvèols la colonització per microflora és menor que a l'exterior, a la vegada que també es pot observar una microrugositat del seu fons que coincideix amb l'acció brostejadora dels individus de *Melaprhe neritoides* que apareixen a la fotografia. d) Alvèols relacionats amb la textura i fàcies de les calcàries algals –rodòlits– del Miocè superior de la Punta de n'Amer (Sant Llorenç, Mallorca).

Figure 2: Pits and micropits. a and b) Coalescent micropits hosting individuals of *Melaprhe neritoides* and *M. punctata* developed on Quaternary aeolianites at Cala Blava (Llucmajor, Mallorca) and Son Bauló (Santa Margalida). c) Pits and micropits at Cap Salines (Ses Salines, Mallorca). Notice that biofilm colonization is more intensive at the interior of pits than outside. At the same time there are visual evidences of the effect of *M. neritoides* grazing activity. d) Pits related to the texture and algal nature (rodoliths) of Upper Miocene outcrops at Punta de n'Amer (Sant Llorenç, Mallorca).

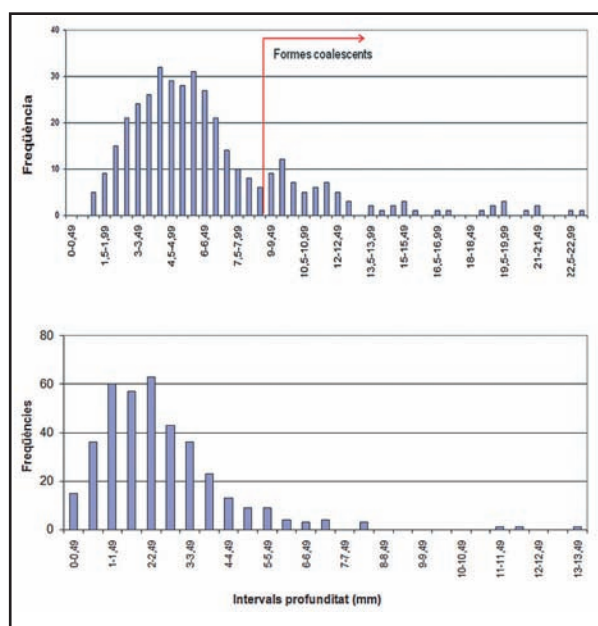


Figura 3: Paràmetres morfomètrics dels microalvèols de Punta des Faralló (Mallorca)

Figure 3: Micropits width and depth distributions at Punta des Faralló (Mallorca)

1985). MOSES & SMITH (1994) caracteritzen l'abast espacial del processos inorgànics –alteració per sals i dissolució– que actuen a les costes del Migjorn de Mallorca a partir d'observacions de microscopi electrònic de rastreig i la difracció de raigs X. De 1998 ençà, hi ha un augment dels treballs que es dediquen a la descripció morfològica i a la identificació del paper dels agents i els processos, tot integrant les dues tradicions, que configuren el karren litoral de Mallorca (GÓMEZ-PUJOL & FORNÓS, 2001, 2002 i 2009a; GÓMEZ-PUJOL, 2006) per passar, amb posterioritat, a contrastar els models a les costes menorquines (GÓMEZ-PUJOL & FORNÓS, 2004a, b i c). Val a destacar que les contribucions més recents han posat l'èmfasi en l'estudi detallat dels paràmetres morfomètrics i els agents i processos involucrats en el desenvolupament de formes com els microalvèols o els microrills (GÓMEZ-PUJOL & FORNÓS, 2009b).

## Formes i criteris de classificació

No resulta gens senzill agrupar les formes desenvolupades sobre el substrat carbonatat de les costes rocoses, ja que les formes i combinacions d'aquestes obrin un ventall tan ample de possibilitats que fan que les classificacions siguin molt diverses. BÖGLI (1980) defensa una classificació dominada per un criteri genètic per tal de simplificar les classes o tipologies morfològiques. No obstant això, els clarsobscurs que encara existeixen sobre els processos que intervenen en el desenvolupament de les microformes d'alteració en el litoral calcari aconsellen un criteri descriptiu de caràcter mixt. Així doncs, a continuació se segueix l'esquema de

FORD & WILLIAMS (1989) en el qual la classificació de les formes descansa en els aspectes de forma, tot i que incorpora subdivisions arran dels factors genètics. Val a dir que les classificacions esmentades tracten exclusivament de les morfologies de karren desenvolupades als ambients no litorals, encara que són d'utilitat per a la sistematització de les formes que ens ocupen ara. Les grans classes que en resulten són: formes negatives i formes positives, tot diferenciant aquelles de planta arrodonida, formes lineals controlades per fractures, formes lineals controlades hidrodinàmicament i un darrer grup de formes complexes o poligenètiques. Pel que fa a la terminologia catalana s'han adoptat les recomanacions de RIBA (1997), mentre que per als altres idiomes s'indica la terminologia present a GINÉS (1999) i a la bibliografia citada al text.

## FORMES NEGATIVES DE PLANTA ARRODONIDA

**Alvèols, microalvèols** – *cockling pits, pits, micropits* (ang.); *alvéoles, micro-alvéoles, vermiculacions* (fr.); *alveólos, microperforaciones, microcáries* (cast.).

Les formes que concorren sota l'epígraf d'alvèols són l'exemple més clar d'una forma convergent. Es tracta de petites depressions de planta arrodonida o el·líptica poc profundes (Fig. 2). Els diàmetres superiors al centímetre són rars i les profunditats no són majors que la meitat del diàmetre (Fig. 3). S'anomenen microalvèols aquelles formes que tinguin un diàmetre inferior al centímetre i alvèols aquelles que el superin. Es poden disposar alineats, seguint diàclasi, en coalescència o de forma aïllada, tant sobre superfícies planes com sobre superfícies verticals. L'absència d'una orientació preferent d'aquestes formes, la manca d'un control gravitatori dominant, juntament amb el recobriment de la superfície de la roca per líquens i/o cianòfits, posa de manifest la importància dels agents biològics en la gènesi d'aquestes formes. FOLK *et al.* (1973) classifiquen aquest seguit de formes com a "fitocarst" en el sentit que són els líquens i els cianòfits, que tenen la roca com a hàbitat, els responsables de la gènesi i evolució d'aquestes formes. En la mateixa línia apunten els estudis de DANIN *et al.* (1982) i els treballs, específicament desenvolupats a un gradient litoral, de JONES (1989) i VILES (1988b).

Pel que fa als processos que contribueixen a l'evolució dels alvèols i microalvèols, en destaca l'acció dels filaments dels líquens (MOSES & SMITH, 1993; CHEN *et al.*, 2000) o l'atac químic derivat de l'acció metabòlica tant dels cianobacteris com dels líquens (FIOL *et al.*, 1996; GEHRMANN *et al.*, 1992; PEYROT-CLAUDE *et al.*, 1995; POMAR *et al.*, 1975).

**Cocons** – *solution pans, basin pools* (ang.); *vasques, mares* (fr.); *cubetas, pozas, tinajitas* (cast.).

Els cocons són depressions de planta el·líptica, poc profundes i de fons pla, les dimensions de les quals oscil·len des de l'ordre centimètric al mètric (Fig. 4). Les seves parets són abruptes i mantenen un angle proper als 90° amb la base. Les parets laterals dels cocons solen presentar extraploms i entalladures de pocs centímetres de profunditat. Es desenvolupen sobre diferents litologies carbonatades i són presents a superfícies



planes o subhorizontals, tant a ambients micromareals com macromareals, sempre i quan hi predominin, a la zona, els processos d'alteració química. Pel que fa a les seves dimensions, la llargària, per norma general, és major que la profunditat. Les relacions entre aquests dos paràmetres varien en funció del substrat.

Els mecanismes genètics implicats en la gènesi dels cocons són bàsicament bioquímics i el gros de la seva formació s'atribueix als processos de dissolució (TRUDGILL, 1987). Les primeres referències respecte del quimisme de les aigües dels cocons es troben als

treballs de FELDMAN & DAVY DE VIRVILLE (1933). Aquests autors, en el marc d'un estudi de la flora de les costes rocoses, analitzen durant un cicle de 24 hores el pH de l'aigua embassada als cocons i detecten oscil·lacions de 8,1 a 10 unitats de pH. Fins aleshores, des d'un punt de vista geomòrfic, el problema de la gènesi dels cocons resideix en la sobresaturació en carbonat càlcic ( $\text{CaCO}_3$ ) de l'aigua de la mar (TRUDGILL, 1976a). Per tant, es proposava l'aigua d'escolament com la responsable dels processos de dissolució que afectaven els cocons (WENTWORTH, 1944). No seria fins als estu-

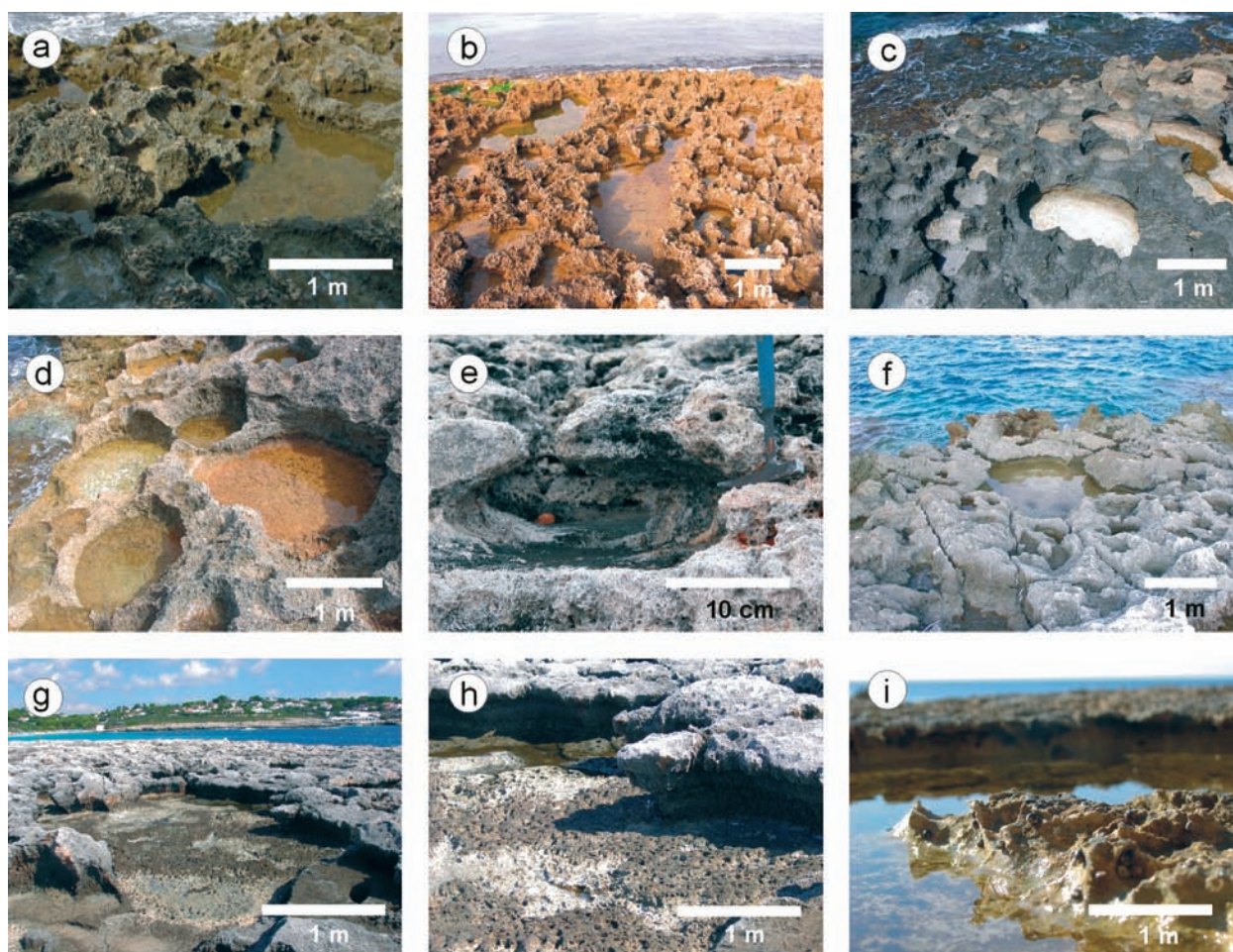


Figura 4: Cocons. a) Cocons interconnectats arran de la intersecció de dues fractures a la contrada de ses Penyes Roges (Calvià, Mallorca) desenvolupats sobre calcàries del Miocè superior. b) Conjunt heteromètric de cocons, els de major desenvolupament –de 5 a 7 m de llargària– ho fan seguint una alineació de fracturació dominant de direcció NE, Cala Blava (Llucmajor, Mallorca). c) Cocons de planta arrodonida sobre un pegat d'eolianites carbonatades a la Cala d'en Guixar (Calvià, Mallorca). d) Cocons aïllats i de planta arrodonida que comparteixen les parets a les eolianites de Tacàritx (Alcúdia, Mallorca). e) Detall de les parets laterals dels cocons amb entalladures accentuades que són evidència del domini de processos de dissolució sobre fàcies de rodòfits del Miocè superior a s'Algar (Menorca). f and g) Cocó de grans dimensions (9 m de llargària), de planta irregular i fons pla, format per la coalescència de vàries formes a Cala Sant Esteve (Sant Lluís, Menorca). h) Detall de la imatge anterior on es pot apreciar els microal·vèols que apareixen al fons de la depressió i evidències, a les parets laterals de dos nivells, de dissolució que marquen el reculament de la paret vertical. i) Detall d'una cresta –antiga paret lateral entre dos cocons– al bell mig d'una forma de dimensions modestes sobre les calcàries del Miocè superior a s'Alavern (Llucmajor, Mallorca).

Figure 4: Basin pools. a) Coalescence of two basin pools due to the enlargement of two joins at Upper Miocene calcareous outcrops from ses Penyes Rotges (Calvià, Mallorca). b) Assemblage of elongated basin pools of different sizes –from 5 to 7 m in width– that follow a dominant NE orientation (Llucmajor, Mallorca). c) Circular plan form basin pools sharing walls on Quaternary aeolianites at Cala d'en Guixar (Calvià, Mallorca). d) Isolated circular plan form basin pools sharing walls on Quaternary aeolianites at Tacàritx (Alcúdia, Mallorca). e) Detail on basin pools walls and their notch profile related to solution processes on Upper Miocene rock outcrops at s'Algar (Menorca). f and g) Large basin pools (> 9 m) developed by coalescence of individualized forms at Cala Sant Esteve (Sant Lluís, Menorca). h) Evidences of multiple levels of basin pool evolution resulting in different notch forms along the basin pool wall. i) Detail of a remnant wall in the middle of a coalescent basin pool at Upper Miocene rock outcrops from s'Alavern (Llucmajor, Mallorca).





Figura 5: Conductes de subsòl al sector més terrestre del perfil de costa, (a) just acabats de desenterrar a les contrades de Punta Prima (Sant Lluís, Menorca) i (b) més evolucionats a Cala Murada (Manacor, Mallorca). El rocam d'ambdues localitats són calcàries algal del Miocè superior.



Figure 5: Soil dissolution tubes or tubules at the landward sectors of the coastal profile. Some of them (a) are recently exhumed at Punta Prima (Sant Lluís, Menorca), other as those in Cala Murada (Manacor, Mallorca) appear completely free of soil and with a external fretted surface. Both study sites are characterized by the outcrop of Upper Miocene calcarenites.

dis d'EMERY (1946), quan s'abordaria el problema des d'una perspectiva analítica. Emery estudià els paràmetres de temperatura ambiental, temperatura de l'aigua, pH i alcalinitat de les depressions sobre substrats calcàris reomplerts d'aigua marina de la costa meridional de Califòrnia (La Jolla). Els seus resultats posaven de manifest l'existència de canvis de pH i d'alcalinitat durant el vespre. SCHNEIDER (1976) desenvolupà el seguiment més complet de paràmetres físics i químics de l'aigua retinduda als cocons a la costa croata. Les corbes d'intensitat de llum, temperatura, concentració d'oxigen, alcalinitat específica, pH, oxigen dissolt, contingut en clorurs, contingut en calci i la relació calci-clorur (Ca/Cl), permeten plantejar aquells mecanismes pels quals s'assimila el bicarbonat, tot descartant com a procés, en l'evolució dels cocons, la dissolució inorgànica. Durant el dia, la flora que entapissa la roca consumeix el CO<sub>2</sub> de l'aigua mitjançant l'acció fotosintètica. En el moment que no disposa de llum suficient atura aquest procés i es produeix un increment del contingut en CO<sub>2</sub> a l'aigua, de manera que es dissocia el carbonat càlcic i el volum d'aigua deixa d'estar sobresaturat, fet pel qual disminueix el pH i s'incrementa el potencial de dissolució. D'altra banda, TRUDGILL (1985) destaca el paper de la dissolució diferencial en funció de la mineralogia dels carbonats, ja que mentre l'aigua marina està sobresaturada en carbonat càlcic, no ho està en magnèsic. DEBRAT (1974) i MILLER & MASON (1994) també duen a terme seguiments de la química de l'aigua dels cocons i, juntament amb altres experiències de laboratori (GUILCHER & PONT, 1957; DALONGEVILLE *et al.*, 1994; TRUDGILL, 1979), apunten en la línia dels treballs d'Schneider, tot posant èmfasi en el control de la microflora que habita a la roca en els processos de dissolució.

Ara bé, la dissolució no és l'únic mecanisme que intervé en el desenvolupament dels cocons. KELLETAT (1997), DALONGEVILLE & LE CHAMPION (1982), TORUNSKI (1979), TRUDGILL *et al.* (1987) i el mateix SCHNEIDER (1976) destaquen l'acció erosiva física i química dels gastròpodes i, en alguns casos, dels equi-

nodermes en l'evolució lateral d'aquestes formes. Tampoc no es pot deixar de banda l'alteració mecànica per l'impacte de l'onatge o de l'alteració per sals, tot i que amb un paper secundari.

#### Conductes de subsòl – soil dissolution tubes, tubules, shafts (ang.); criptolapiaz (cast.).

Els conductes tubulars són formes de planta arrodonida, de profunditat força més gran que no el radi i que evolucionen en sentit gravitatori aprofitant les línies de debilitat de la roca. Les relacions entre els seus eixos són d'1 a 1 per a les dimensions en planta i d'1 a 2 respecte l'eix major i la profunditat. Les dimensions dels conductes varien de mínims de 4×4×9 cm fins a màxims de 26×26×50 cm. La forma vertical del conducte pot ésser sinuosa i, en molts casos, apareix amb sòls originals o d'erosió al seu interior. També es pot donar el cas de trobar-hi una gradació que va des de material al·lòcton (restes de *Posidonia oceanica*, bioclasts) a una potència considerable de llims vermells. Les parets són suaus, amb evidents signes d'una dissolució homogènia facilitada per la cobertura edàfica (Fig. 5). FORD & WILLIAMS (1989) i GINÉS (1999) identifiquen aquest tipus de forma com el resultat de l'aflorentament de formes subedàfiques arran de l'erosió del sòl. A les localitats estudiades (GÓMEZ-PUJOL, 2006) aquestes formes apareixen als sectors més terrestres de la franja costanera, tot sovint isolades o entre els cocons i a superfícies planes. És freqüent trobar exemples d'aquesta forma l'exposició de les quals és recent o bé que estan parcialment desenterrades i encara es pot apreciar el sòl original al seu interior.

#### FORMES LINEALS CONTROLADES PER FRACTURES

##### Microfissures – microfissures (ang.), microfisuras (cast.)

Les microfissures són formes lineals rectilínies, la direcció de les quals està governada per l'estratifica-



ció o les diàclasis del substrat. Són molt poc profundes (< 1cm) i la longitud pot ésser d'alguns centímetres. Són bàsicament formes de dissolució que aprofiten els plans de debilitat de la roca per desenvolupar-se. L'aigua que circula per les microfissures prové, bé de la pluja, bé de l'onatge (Fig. 6). Les microfissures, com bona part de les formes lineals, són presents al sector més terrestre del domini del ruixim (*spray*).

**Esquerdes** – *splitkarren*, *vein-guided solution fissures* (ang.)

Les esquerdes són depressions estretes, poc profundes i molt allargades que segueixen la direcció de les

diàclasis. Aquestes morfologies oscil·len des de pocs centímetres fins a un parell de metres, tot i que la seva amplada i fondària no supera l'ordre centimètric. Quan sobre un substrat s'hi donen varies famílies de diàclasi, les esquerdes poden formar canals, aparentment, meandriformes (Fig. 6). A la dissolució preferent del pla de debilitat, també cal afegir-hi altres processos d'alteració, de caràcter biocàrstic, que contribueixen a l'evolució d'aquestes formes lineals. Les esquerdes destaquen sobre aquelles superfícies lleugerament inclinades cap a la mar i allà on els sistemes de cocons no estan ben desenvolupats.

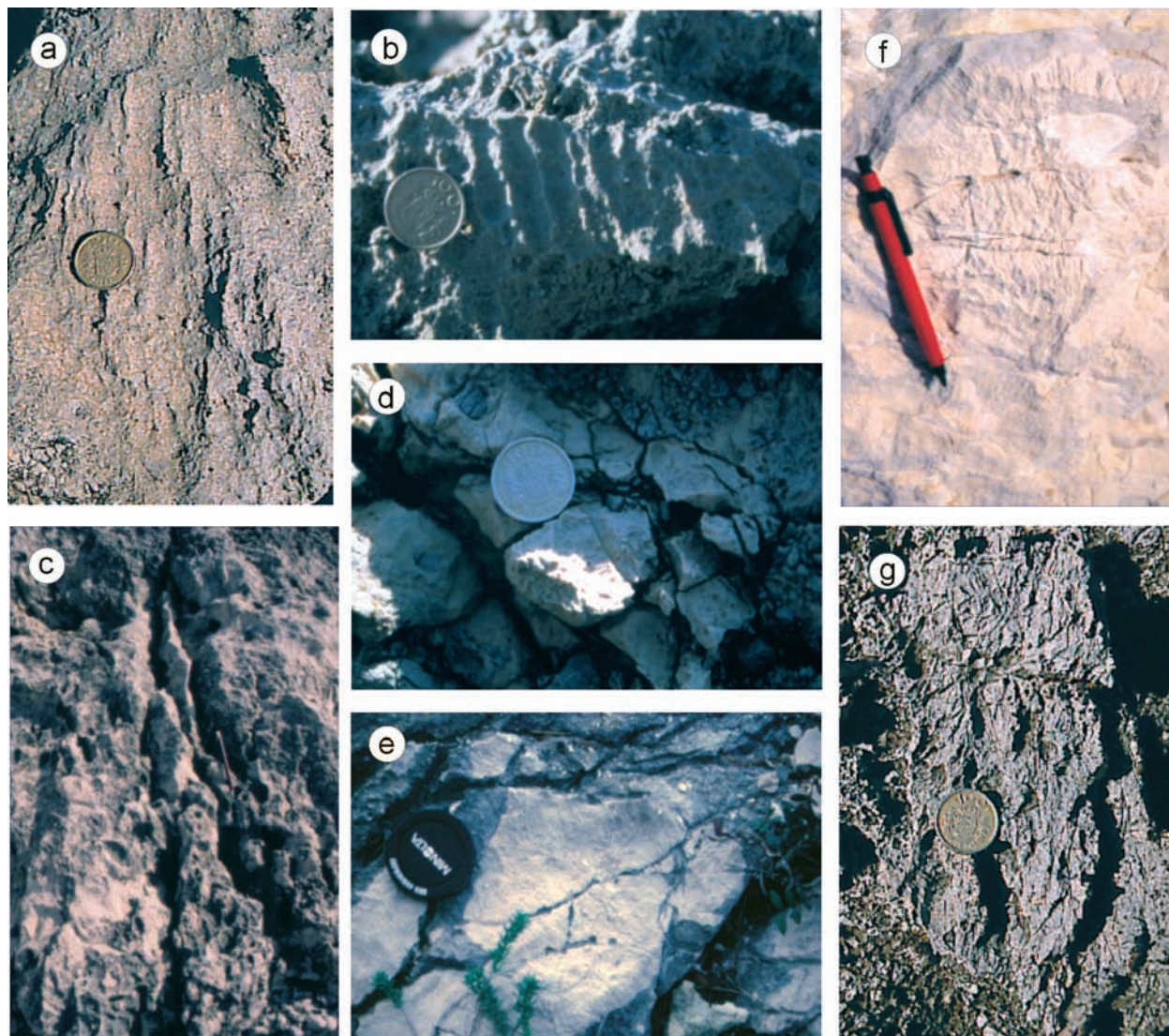


Figura 6: Formes lineals. a i b) Estries desenvolupades sobre calcarenites del Miocè superior (Cala Murada, Mallorca) i bretxes juràsiques (Cala d'en Guixar, Calvià, Mallorca), respectivament. c) Esquerdes amb longitud d'ordre mètric i amplada d'ordre cm, desenvolupades seguint la fracturació a la Punta des Sivinar (Santanyí, Mallorca). d) Microsolcs trenats presents sobre els clasts d'una bretxa. El clast és d'una textura més fina que no la matriu a Cala d'en Guixar (Calvià, Mallorca). e) Microsolcs desenvolupats sobre una superfície plana, que comencen a ésser desmantellats per petits microal·lèols. La textura de la roca és de tipus mudstone. Cala Murada (Manacor, Mallorca). f i g) Microfissures sobre calcàries mesozoïques i bretxes juràsiques a la Punta des Faralló (Cala Rajada, Capdepera, Mallorca) i a Cala d'en Guixar (Calvià, Mallorca), respectivament.

Figure 6: Lineal forms. a and b) rillenkarren developed respectively on Upper Miocene calcarenites (Cala Murada, Mallorca) and Jurassic breccias (Cala d'en Guixar, Mallorca). c) Splitkarren with lengths larger than 2 m and widths of few cm controlled by fractures at Punta des Sivinar (Santanyí, Mallorca). d and e) Microrills developed on fine texture rocks at Cala d'en Guixar (Calvià Mallorca) and Cala Murada (Manacor, Mallorca). f and g) Microfissures on mesozoic limestones (Punta des Faralló, Capdepera, Mallorca) and on Jurassic breccia at Cala d'en Guixar (Calvià, Mallorca).



## FORMES LINEALS CONTROLADES PER HIDRODINAMISME

### Microsolcs – microrills, rillenstein (ang.)

Els microsolcs són formes lineals l'amplada dels quals sol ésser d'1 mm i molt poc profunds. Així com les microfissures tenen un fons angulós i abrupte, els microsolcs el presenten més suau i arrodonit. Són sinuosos i, fins i tot, trenats sobre superfícies subhorizontals que esdevenen rectes amb l'increment del pendent (Fig. 6). Es localitzen únicament a la zona afectada pel ruixim de l'onatge i sobre superfícies de textura molt fina i homogènia. FORD & WILLIAMS (1989) atribueixen la gènesi d'aquesta morfologia als fluxos d'aigua per capil·laritat i destaquen el paper que puguin tenir les rosades o les pel·lícules primes d'aigua com a agents d'alteració. A ambients litorals, aquesta particular morfologia també ha estat identificada per FORD & LUNDBERG (1987) al supralitoral calcari de l'illa de Vancouver (Canadà) i, per la seva banda, GINÉS (1993) també ha identificat aquestes formes a les costes de l'arxipèlag de Cabrera.

**Estries – rillenkarren, solution flutes (ang.), cannelures (fr.); estrías de lapiaz (cast.)**

Les estries són canals de fons arrodonit i parets fines organitzades de forma paral·lela que es disposen des de la cresta d'una roca llisa i disminueixen la seva profunditat fins a desaparèixer pendent avall (FORD & LUNDBERG, 1987). Les estries es caracteritzen per mantenir una amplada més o menys constant a cada localitat (entre 1,2 i 2,1 cm a la Serra de Tramuntana de Mallorca), mentre que la longitud varia en funció d'un gradient relacionat amb les temperatures i la pluviometria (GINÉS, 1999). Els processos que intervenen en la seva formació són, bàsicament, la dissolució provocada per l'aigua de precipitació i l'acció derivada del metabolisme de líquens i cianòfits que entapissen la roca (FIOL *et al.*, 1996). No hi ha gaire informació sobre el desenvolupament d'aquesta forma en els conjunts de karren litoral, llevat dels estudis de MILLER & MASON (1994) al sud de Sudàfrica, on s'hi desenvolupen sobre dipòsits de platja i eolianites quaternàries (Fig. 6).



Figura 7: Pinacles. a) Pinacles aïllats just a tocar de la plataforma litoral i d'altres que encara estan units a les seves bases a Cala Agulla (Capdepera, Mallorca). b) El desenvolupament dels pinacles, en aquest cas sobre eolianites quaternàries, dona lloc a topònims com la Punta de ses Punxes (Cala Blava, Llucmajor, Mallorca). c) Pinacles aïllats a la Punta de Tacàritx (Àlcúdia, Mallorca). d i e) Detall dels microalvèols superposats a la forma piramidal dels pinacles al Far de Ciutadella i Punta Prima (Menorca). Observi's la manca d'orientació preferent dels microalvèols.

Figure 7: Pinnacles. a) Isolated pinnacles preceding the shore platform. Most of their basis remain connected by a flat chain, Cala Agulla (Capdepera, Mallorca). b) The abundance of features as pinnacles result in site names as Punta de ses Punxes –Spines cape– at Cala Blava (Llucmajor, Mallorca). c) Isolated pinnacles at Punta de Tacàritx (Àlcúdia, Mallorca). d and e) Detail on the pits and micropits superposed to the pinnacle gross morphology (Far de Ciutadella i Punta Prima, Menorca). Notice that micropits do not follow any preferent orientation.



**Canals de decantació** – *solution runnels, wandkarren, wall karren* (ang.),

Aquesta és una morfologia poc comuna en el karren litoral. Es tracta de canals amb una amplada que supera el cm, paral·lels entre ells. Es disposen sobre l'extraplom de cocons que han aprofitat l'estructura de la roca per desenvolupar-se, de manera que actuen com a col·lectors de l'aigua cap a l'interior dels cocons.

## FORMES POSITIVES REMANENTS

**Pinacles** - *spitzkarren, pinnacles* (angl., fr.), *aguja* (cast.)

Els pinacles són cossos de roca de forma piramidal aïllats els uns dels altres. Les dimensions són força variables i depenen de factors molt locals (LEY, 1979). Els pinacles apareixen a la transició entre la zona d'estopeig de l'onatge i el domini dels esquits. En general, els pinacles tenen una aparença molt esponjosa perquè estan completament entapissats per microalvèols sense cap tipus d'orientació preferent (Fig. 7). D'altra banda, les seves arestes són molt abruptes. Els pinacles s'entenen com el relleu residual d'una superfície prèvia que ha estat desmantellada per l'alteració física i química durant la formació dels cocons (MILLER & MASON, 1994; SUNAMURA, 1992). De fet, és molt comú observar a l'interior dels cocons restes dels nodes que comunica-

ven un grup de cocons coalescents i que, amb el temps, han quedat aïllats deixant un testimoni en forma de piràmide, de pinacle. TRUDGILL (1979), FOLK *et al.* (1973) i JONES (1989) atribueixen la gènesi dels pinacles a l'erosió diferencial i a l'alteració biològica, especialment pel que fa al microrelleu superposat a la forma piramidal. MOSES (2003) hi lliga l'alteració per sals.

## L'organització de les formes

El karren litoral presenta una organització i una gradació interna molt acusada. Comptat i debatut, la gradació de les formes, la fauna i la flora és una de les característiques més destriables de les costes rocoses (SPENCER, 1988), que està associada al grau d'humidificació derivat de l'onatge i a la forma del perfil de costa (PALMER *et al.*, 2003). En aquest sentit, la Taula I sintetitza la presència de les formes inventariades a cada perfil en termes d'abundància relativa, a la vegada que s'intenta correlacionar la seva distribució amb les zonacions biològiques i hidrodinàmiques del litoral. Els termes relatius amb què s'ha dividit cada un dels perfils, quan s'hi aborda en conjunt, aboca un gradient on formes com marmites i alvèols lligats a l'activitat biològica dels bogamarins són característiques del domini de la

Zonació morfològica		Plataforma litoral	Zona $\alpha$	Zona $\beta$	Zona $\delta$	zona $\Omega$
Planta arrodonida	Cocons	r	+	+++	+++	+
	Alvèols	+	+++	++	+	+
	Microalvèols	-	+++	+++	++	+
	Taffoni	-	-	-	-	+
	Nius d'abella	-	-	-	-	+
	Marmites	++	+	r	r	r
	Conductes subsòl	-	-	-	+	++
Planta lineal control fractures	Microfissures	-	-	r	+	+
	Esquerdes	+	+	+	++	+
Planta lineal control hidrodinamisme	Microsolcs	-	-	-	+	++
	Estries	-	-	r	r	r
	Canals decantació	-	-	r	r	-
Poligèniques	Pinacles	-	+++	+	-	-
	Notch	+	-	-	-	-
	Plataforma	++	-	-	-	-
	Trottoir	+++	+	-	-	-
	Bufadors	+	+	r	-	-
Zonació hidrodinàmica		onatge	rompuda onatge	esquitxos	ruixim	
Zonació biològica		plataforma	zona a	zona b	zona c	

Taula I: Abundància relativa de les formes que integren el karren litoral i altres d'associades a les Illes Balears en funció de la zonació morfològica (+++ molt abundants, ++ abundants, + presents, r rares, - absent).

Table I: Summary of relative abundance of coastal karren features and associated forms at Balearic Islands according to the morphological zonation (+++ very abundant, ++ abundant, + present, r rare, - absent).

plataforma litoral, mentre que els alvèols són molt importants a la zona  $\alpha$  i disminueixen el seu pes relatiu, així com avança el sector terrestre. És una tendència lleugerament inversa a la dels cocons, o a la dels conductes de subsòl i les microfissures. Els primers són molt abundants als sectors intermedis del perfil, mentre que els altres dos són abundants als sectors més terrestres. Els pinacles queden, també, ben sectorialitzats a l'espai que delimiten, per una banda, la plataforma litoral i, per l'altra, la presència abundant de cocons. Així doncs, si s'integra la zonació morfològica, la hidrodinàmica i la biològica es pot definir una seqüència general pel que toca a l'organització de les formes del karren litoral de les Illes Balears en què queden ben definits cinc mòduls (Fig. 8).

El primer dels mòduls lliga el domini de l'onatge amb les comunitats biològiques de plataforma litoral. És el mòdul que queda definit per les plataformes litorals i les concrecions orgàniques que duen associades. En aquest segment del perfil de costa, que roman quasi sempre per sota del nivell marí, és freqüent trobar-hi algunes formes molt característiques d'origen biològic. Es tracta de les cavitats alveolars que deixen els bogamarins i que mantenen una relació geomètrica amb la mida d'aquests individus. La resta de plataforma està entapissada per pradells d'algues verdes (majoritàriament *Cystoceria* sp.), així com també per concrecions d'algues calcàries i vermètids. Aquesta coberta actua com a agent de protecció i evita, en bona part, l'erosió mecànica de la plataforma, desplaçant l'onatge i la seva acció cap a l'interior del perfil. Només quan el perfil subhoritzontal de la plataforma comença a esdevenir vertical, ens trobam amb una entalladura (*notch*), o amb un esglaó a partir del qual comença la zona emergida de la costa rocosa. A grans trets, en ambdós casos, es tracta de superfícies amb abundants microalvèols, completament recoberts de cianobacteris i, a les zones més properes al nivell marí, d'algues calcòfiles i bioherms de bivalves (*Mytilus edulis*). Juntament amb els microalvèols descrits a l'inventari, és fàcil trobar formes alveolars creades per gastròpodes com les pegellides (*Patella* sp.) i els polioplacòfors (*Chiton* sp.).

El segon dels mòduls, la zona  $\alpha$ , coincideix amb

l'abast de la rompada de l'onatge sobre el perfil de costa. Aquest abraça des de la part superior del *notch* o de l'esglaó, fins allà on arriben els esquits amb major intensitat. Hi són presents, amb caràcter dominant, els pinacles amb tot el reguitzell de microalvèols superposats. Les dimensions dels pinacles oscil·len dels 20 cm a quasi bé 1 m en alçària. Les formes són variades, en funció del nombre de diàclasis i les seves direccions i la intensitat dels microalvèols que se superposen a la forma piramidal base. El color de la superfície de la roca és fosc arran de la intensa colonització per cianòfits i líquens (*Rivularia* sp., *Pynerocollema* sp.). Hi comencen a aparèixer els primers individus de *Melaphe neritoides* o *Melaphe punctata*. Les pegellides (*Patella rustica* i *P. caerulea*) són relativament abundants a les superfícies horitzontals entre pinacles, o bé a les parets verticals que s'aixequen just després de la plataforma litoral. El patró també és semblant per a *Monodonta turbinata*. Les esquerdes i fractures eixamplades –*splitkarren*–, que apareixen a la zona  $\alpha$ , acostumen a estar intensament colonitzades per crustacis filtradors (*Chthamalus depressus* i *Chthamalus stellatus*), especialment quan l'aigua s'hi escola i hi corre. La superfície de la roca és rugosa i durant els episodis secs queda coberta d'eflorescències salines.

Dellà dels pinacles completament aïllats, i quan es comença a donar la transició entre els esquits intensos a l'impacte de les gotes d'aigua, hi dominen les formes de planta arrodonida. En aquest mòdul (zona  $\beta$ ), els pinacles es mantenen units a la seva base per petits cordons, conformant petites conques que recorden, tot i que en un altre factor d'escala, els relleus de *cockpit* tropicals. En aquesta zona els cocons mostren un alt grau de connexió, del 70% al 90% dels casos, i la majoria presenten sobreploms. A la zona  $\beta$  les relacions entre els eixos que defineixen la planta dels cocons són d'1,5 a 2. En funció de la litologia s'aprecia un augment de les dimensions mitjanes de llargària dels cocons (Fig. 9). Les dimensions dels cocons sobre roques molt resistents, i amb una intensa fracturació (i.e. rocams del Juràssic i del Cretaci), són menors que les de les localitats amb un aflorament de calcarenites del Miocè superior,

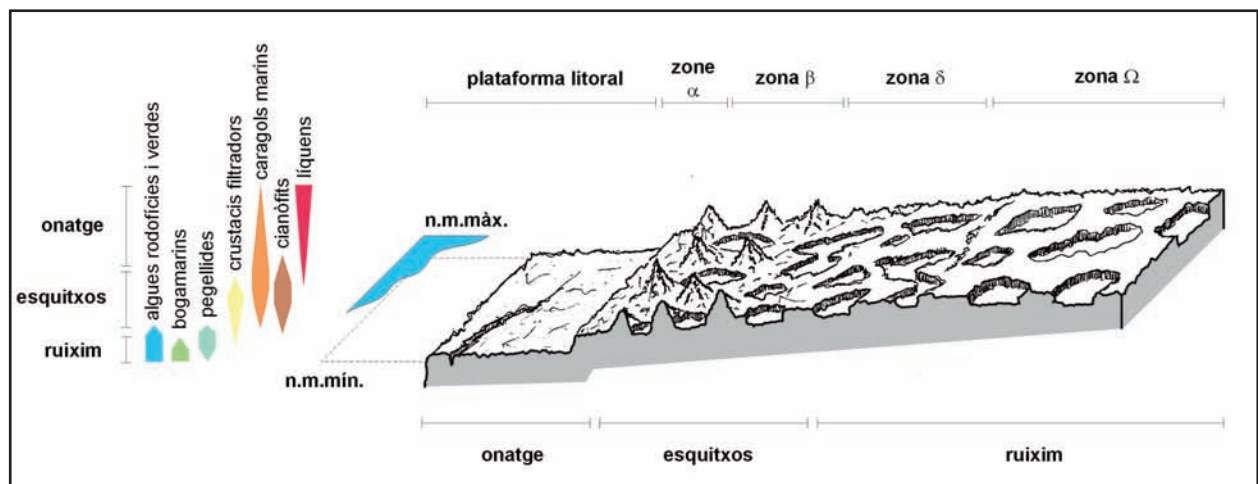


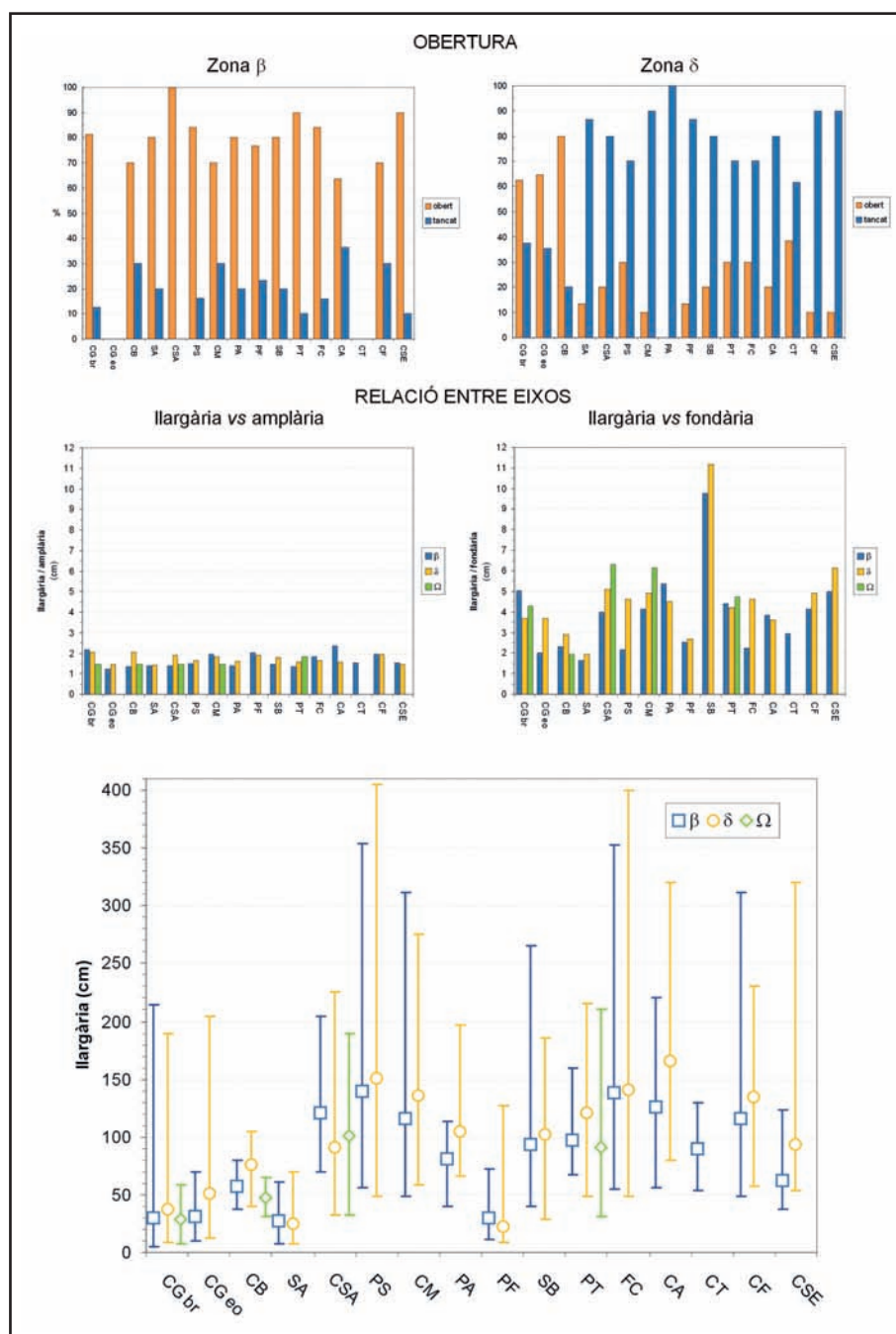
Figure 8: Organització de les formes del karren litoral a les Balears.

Figure 8: Morphological, biological and hydrodynamic zonation at coastal karren systems in Balearic Islands.



Figura 9: Paràmetres morfomètrics i atributs de forma dels cocons atenent a la zonació geomòrfica i al control litològic.

Figure 9: Basin pool morphometrical and shape parameters according to the morphological zonation and the rock control.



o d'eolianites quaternàries. És a dir, són més llargs que amples, l'eix major és quasi dues vegades l'eix menor (Fig. 9). Pel que fa a les relacions entre llargària i fondària, les relacions entre eixos abracen mínims de 2 a 1 i arriben a màxims de 5 a 1, tot i que hi ha casos que arriben a proporcions de 9 unitats de llargària per 1 de fondària. Tot plegat no ve sinó a destacar el fet que es tracta de depressions somes.

Ja dins els dominis del ruixim (zona δ), quan l'aportació de l'aigua de mar ve en forma d'aerosol, els cocons continuen essent les formes més característiques. Aquest cop, però, es troben aïllats els uns dels altres (entre el 35% i el 100% de les observacions) i en pocs casos presenten sobreploms (Fig. 9). Respecte del mòdul anterior, les dimensions mitjanes dels cocons són lleu-

gerament superiors. Aquesta és una característica que es dona en tots els tipus de litologies i a gairebé totes les localitats estudiades (GÓMEZ-PUJOL, 2006). No hi ha diferència pel que fa a les relacions entre llargària i amplària respecte de la zona β. Ben al contrari del que passa amb les proporcions entre llargària i profunditat, que se situen en quocients de 4 o 6 a 1. En altres paraules, els cocons del mòdul δ són més llargs, igual d'amples, i menys profunds que els dels sectors del perfil que el precedeixen (Fig. 9). Les superfícies entre cocons estan microalveolitzades, tot i que, com passa amb la cobertura de cianòfits, la densitat de microalvèols disminueix terra endins. Comencen a aparèixer alguns líquens crustacis a la superfície de la roca i el gastròpode *Melapaphe neritoides* assolix densitats de 200 a 600 ind·m<sup>-2</sup>,

encara que sobre les eolianites quaternàries pot arribar a 1.700 ind·m<sup>-2</sup>. En aquesta zona del perfil, s'hi poden localitzar microsolcs quan apareixen pegats de roca de textura fina i homogènia, així com conductes de subsòl desenterrats i lleugerament remanegats.

Rere el domini del ruixim, allà on l'acció dels processos marins és més confosa (zona  $\Omega$ ), encara s'hi troben alguns cocons. Això sí, apareixen aïllats (com a mínim un 85% dels casos) i tenen un aspecte més suau, amb parets i fons arrodonits. Una densitat de cocons menor permet apreciar sobre les superfícies subhoritzontals un seguit de formes lineals controlades per la fracturació. Dins aquestes esquerdes o a les parets dels cocons, hi trobam poblacions considerables de *Melaraphe neritoides*, de 271 a 897 ind·m<sup>-2</sup>. La superfície entre cocons és menys rugosa que en el mòdul anterior i arriben a donar-se aparences suaus o arrodonides quan els líquens hi són presents (especialment *Verrucaria* sp.). Els microsolcs continuen apareixent de forma intermitent, quan la textura de la roca ho permet. En funció de la forma i exposició del perfil, l'erosió dels sòls permet avaluar, en aquesta zona, la transició dels conductes de subsòl a formes del karren litoral. Amb l'aparició dels primers *Limonium* sp. es deixa enrere el domini marí per passar al pròpiament terrestre.

## Processos, zonació i evolució del karren litoral

Les evidències de formes "clàssiques" de dissolució al rocam carbonatat dels litorals de les Balears es restringeixen a les superfícies d'aparença suau i als conductes de subsòl. Aquestes formes estan relacionades amb la dissolució estrictament química que es produeix per sota de la cobertura edàfica (GINÉS, 1999). Arran de l'erosió del sòl, aquestes formes queden exposades a l'acció dels agents d'alteració subaèria que, a poc a poc, accentuen la rugositat de la superfície (p.e. desenvolupament de microrills, microalvèols). A partir del moment en què la superfície de la roca s'ha exhumat, llavors s'inicia la colonització per líquens, fongs i cianòfits, que arriben a entapissar la roca i a protegir-la de l'acció física de les gotes d'aigua de pluja, o dels esquit

i el ruixim de les onades. A la vegada, la textura rugosa dels líquens crustacis afavoreix una major retenció de les pel·lícules d'aigua, que contribueixen d'una manera homogènia i gradual a l'alteració química de la roca. El biofilm també desenvolupa la seva pròpia acció fisico-química (CHEN *et al.*, 2000; VILES, 1987).

Els cocons també es consideren com a formes típiques de dissolució (TRUDGILL, 1987), tot i que cal fer-ne alguns matisos. Encara que aquestes depressions poden, en algunes ocasions, estar reomplertes d'aigua de precipitació o bé d'escolament, amb prou agressivitat química per iniciar la dissolució del rocam carbonatat, aquesta no és la situació més habitual. En la majoria de les ocasions, els cocons recullen aigua marina que per composició està sobresaturada de carbonat càlcic. Per tant, no és possible que es produeixi la dissolució, en termes clàssics, de la roca. SCHNEIDER (1976) i TRUDGILL (1979) posen de manifest que durant el vespre, amb la foscor, l'aigua marina retinduda als cocons experimenta un procés de desaturació respecte del carbonat càlcic. L'activitat fisiològica del biofilm que habita sobre i dins la roca, n'és la responsable. Durant el dia, el biofilm consumeix CO<sub>2</sub> arran de la seva activitat fotosintètica fins que disminueix la intensitat de la llum, fins al punt que no hi ha els nivells suficients per realitzar la fotosíntesi; llavors, el contingut en CO<sub>2</sub> de l'aigua retinduda al cocó augmenta, de manera que l'aigua deixa d'estar sobresaturada de CaCO<sub>3</sub> i n'augmenta la capacitat agressiva. Així doncs, la dissolució inorgànica —entesa com la solució dels carbonats estrictament per la reacció amb aigua dolça— s'ha de descartar com a mecanisme genètic dels cocons litorals. El procés de dissolució és bioinduït, té una marcada component biològica, i també és el responsable de la formació de microalvèols, alvèols i pinacles, tot i que no es pot menysprear l'acció de l'alteració per sals (MOSES, 2003; MOSES & SMITH, 1994) i el propi atac bioquímic dels cianòfits (JONES, 1989). A les zones properes al mar on s'han registrat les majors densitats i accions erosives associades als macroorganismes brostejadors, l'acció bioerosiva i bio-corrosiva juga un paper prou important que, juntament amb l'acció física de les onades, contribueix a l'erosió del rocam.

Així doncs, un mínim de quatre vectors d'alteració i/o d'erosió poden diferenciar-se sobre els sistemes del karren litoral, en funció de la distribució de les formes (a meso, micro i nanoescala) i el control de l'estructura, la

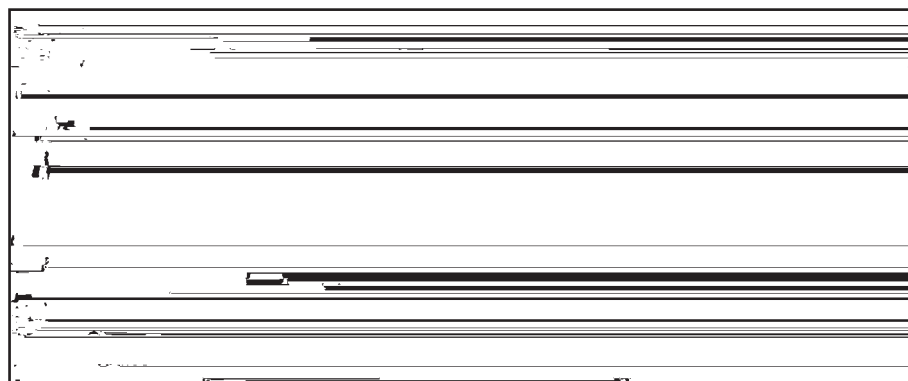


Figure 10: Abast espacial dels processos actius als perfils amb karren litoral de Balears. DIN: Dissolució inorgànica, MB: alteració biològica o induïda pels organismes, MS: Alteració per sals, BE: Bioerosió.

Figure 10: Spatial domain of the different processes operating in coastal karren at Balearic Islands: DIN: inorganic solution; MB: bioweathering or weathering induced by organisms; MS: salt weathering; BE: bioerosion.



història geològica i el gradient hidrodinàmic (Fig. 10). El primer vector es correspon a la dissolució entesa com a procés estrictament inorgànic. Aquesta component disminueix de terra cap a mar i té la seva expressió més important en els conductes de subsòl exhumats i en algunes depressions de subsòl que un cop retreballades passaran a funcionar com a cocons. La dissolució inorgànica és especialment important a la zona  $\Omega$  i en menor mesura a la zona  $\delta$ . L'alteració biològica o la dissolució

bioinduïda és el segon vector i el procés d'alteració més important en el karren litoral, bé pel control de l'agressivitat de l'aigua retinguda als cocons, bé per l'atac químic directe sobre la roca de cianòfits i organismes brostejadors. Aquest vector és especialment important a les zones morfològiques  $\alpha$  i  $\beta$ . A la zona  $\delta$  disminueix. En aquesta mateixa línia, el tercer vector considera l'acció bioerosiva desenvolupada pels organismes brostejadors que, en termes absoluts, és transcendental a la

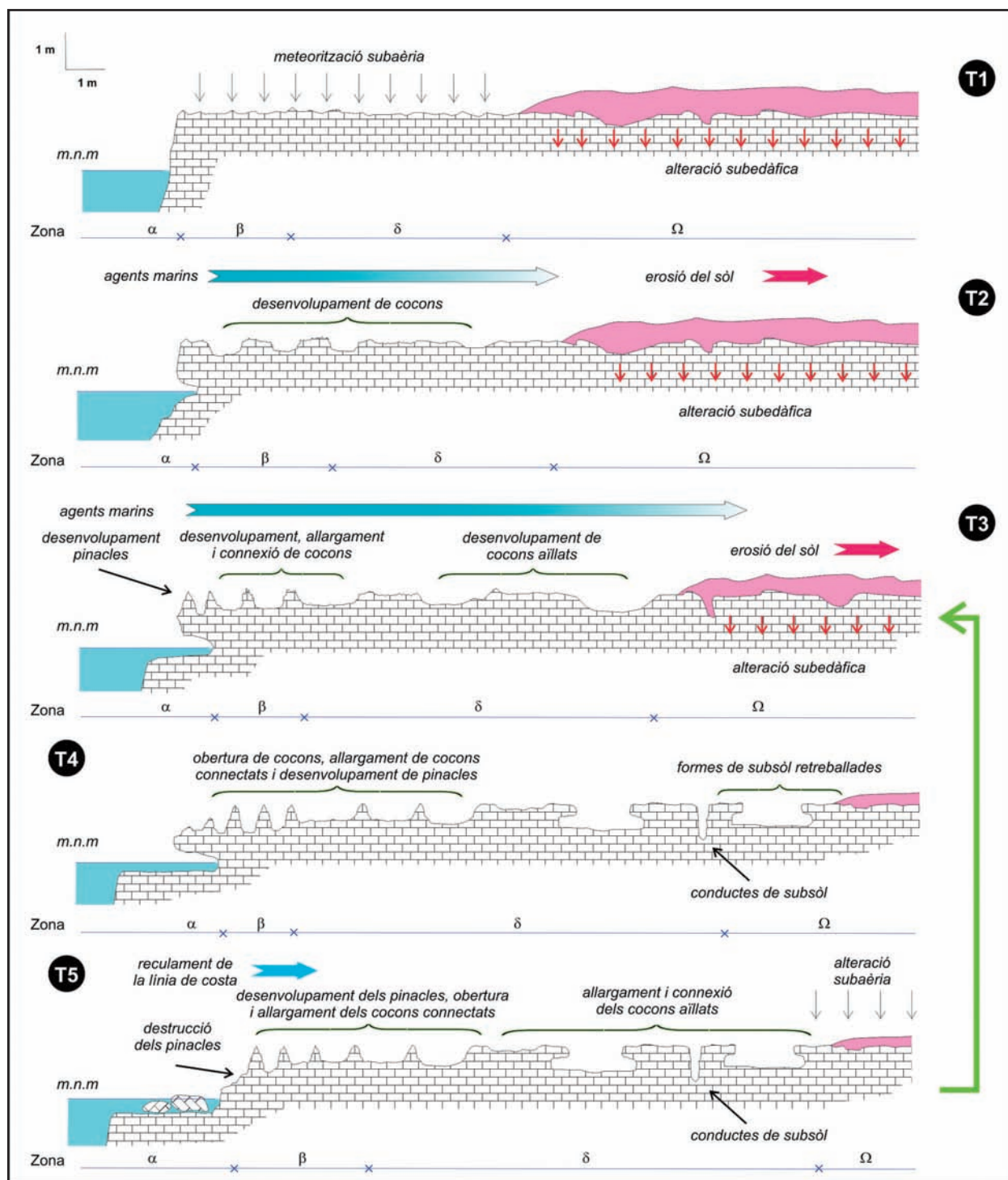


Figure 11: Model evolutiu proposat pel karren litoral a les Illes Balears.

Figure 11: Evolution model for coastal karren landforms in Balearic Islands.

plataforma litoral i a la zona  $\alpha$ , i disminueix progressivament terra endins. Finalment, el quart vector, l'alteració per sals, juntament amb l'acció mecànica de l'aigua són importants a la zona  $\alpha$  i disminueixen progressivament d'acord amb l'extensió dels dominis hidrodinàmics dels esquits i del ruixim.

A partir del conjunt de localitats estudiades, de les observacions a diferents escales i de la consideració dels controls sobre les formes, es pot establir una distribució general dels processos sobre el perfil i un model evolutiu per al karren litoral de Balears.

El primer estadi del model evolutiu es correspondria amb un escenari on la superfície de la roca no es veuria afectada pels agents i processos marins. A partir de la presència de paleoformes de subsòl entre els cocons als perfils actuals, s'infereix el retrocés d'una cobertura edàfica que augmentaria la superfície de rocam exposada a l'acció dels agents marins i l'alteració subaèria a l'estadi primigeni (Fig. 11 T1).

El segon estadi el representaria el desenvolupament dels cocons, aprofitant les debilitats litològiques i estructurals de la roca, a partir de l'acció conjunta de la dissolució inorgànica i la bioinduïda per la microflora que colonitzaria la roca. Els processos marins guanyen protagonisme i, aprofitant les línies de debilitat de la roca, amb la contribució de la bioerosió, es començaria a llavorar un *notch* a la façana del penya-segat. (Fig. 11 T2).

El tercer estadi ja implicaria una organització completa del perfil de karren litoral. El sòl segueix retrocedint i deixa nous espais per a la colonització biològica i el remanegament de les formes de subsòl que poden retenir l'aigua aportada pels esquits i el ruixim. A la vegada, s'eixamplarien els antics cocons, tornarien més profunds i, en alguns casos, arribarien a compartir envans arran del seu eixamplament. Els més propers a la vorera de mar patirien l'estopeig de les onades durant les tempestes i podrien arribar a trencar-se les seves parets més primes. En funció de la densitat de la fracturació i les propietats de les roques, alguns envans dels cocons són més resistents, no es desmantellen amb l'atac de l'onatge i romanen com a cossos piramidals que suposen l'inici de la presència dels pinacles al perfil (Fig. 11 T3). Les superfícies més properes al mar presenten una colonització més important de cianòfits que alteren la roca augmentant-ne la microrugositat que, juntament amb la meteorització per sals, donarien als pinacles una aparença esponjosa. Es començaria a desenvolupar una plataforma litoral sobre la qual s'hi instal·laria una comunitat de macroalgues i algues coral·lines que entapissarien la seva superfície. Els bogamarins brostearien aquesta comunitat per sobre i perforarien la roca per instal·lar-s'hi i romandre protegits de les onades.

El quart estadi (Fig. 11 T4) correspondria amb l'eixamplament dels cocons de la zona  $\beta$  fins al punt de convertir-se en pinacles aïllats. Aquells cocons que inicialment estaven aïllats i tancats, ara comparteixen envans i els més propers al mar són desventrats. La coalescència és dominant i les plantes el·líptiques inicials esdevenen més complexes. Terra endins els cocons isolats s'eixamplen. El sòl retrocedeix fins a permetre la interferència entre les formes de subsòl i les marines. Els antics pinacles han estat parcialment desmantellats i ara apareixen com a irregularitats en la topogra-

fia. La plataforma litoral s'eixampla a favor de la mossa del *notch*, perquè la comunitat d'algues i la pàtina de concrecions calcàries que l'entapissa, a la vegada que redueix l'energia de les onades, les desplaça cap a l'interior del perfil.

El cinquè estadi (Fig. 11 T5) coincideix amb el trencament del *notch* i la caiguda del seu sostre. Aquest fet implica, d'alguna manera, l'augment de l'amplària de la plataforma i el desplaçament de la influència dels agents marins terra endins. A partir d'aquest punt, l'evolució del karren litoral segueix una estructura cíclica en què es reprenen situacions com les descrites per a l'estadi segon o tercer. No és gens senzill considerar quina és la posició temporal de l'estadi primer. Per a la costa meridional de Mallorca, FORNÓS *et al.* (2005) daten la formació del penya-segat, arran d'una falla normal, entre el Plistocè mitjà i el superior (275 a 40 ka). El nivell marí ha estat força mudadís fins a 6.000 anys enrere (TUCCIMEI *et al.*, 2006). Si per als afloraments corresponents a les eolianites quaternàries, la fita dels 6.000 anys serviria per recolzar l'estadi inicial per a les localitats llavorades a les calcàries del Miocè o als afloraments plegats mesozoics, la presència de marmites, cocons i *notchs* fossilitzats en dificultaria acotar l'inici del desenvolupament del sistema, perquè entre d'altres raons TUCCIMEI *et al.* (2006) descriuen posicions del nivell marí similars a l'actual per a diferents estadis isotòpics.

## Algunes observacions a mode de conclusió

A mode de conclusió, cal destacar dos aspectes del model proposat arran de la combinació de la zonació morfològica i els controls sobre el karren litoral a diferents escales:

El primer aspecte és el fet que els pinacles i el seu desenvolupament no són una forma o un element, *sensu stricto*, del karren litoral perquè resulten del desmantellament dels cocons. De fet, són l'única forma de relleu positiva de les descrites a l'inventari de formes associades al microrelleu dels litorals calcaris.

El segon dels aspectes per considerar està relacionat amb el paper de la biologia en l'evolució i organització del karren litoral. De fet, tot i els controls relatius a la història geològica, al control estructural i a la forma del perfil, el karren litoral s'organitza d'acord amb la combinació d'un gradient biològic i un d'hidrodinàmic, per tant en funció d'una zonació ecològica. L'ecosistema o els ecosistemes presents al llarg del perfil controlen, arran de la seva etologia, el desenvolupament de les formes d'alteració del rocam a diferents escales i ordres de magnitud, bé com a agents en el canvi del quimisme de l'aigua dels cocons que en permet l'eixamplament per dissolució, bé per l'erosió dels grans i el ciment de la roca, o per la fatiga a què està sotmesa la roca arran de la perforació de cavitats i galeries que ofereixen una superfície major d'atac a processos, com l'acció mecànica de les onades o l'alteració per sals; així com també a l'acció de la dissolució química. Així doncs, el karren litoral no es pot



entendre com un tipus de modelat exocàrstic “clàssic”, perquè la dissolució, tot i ser el procés dominant sobre el rocam carbonatat, es pot considerar en la seva major part bioinduïda. Per tant, el karren litoral cal que sigui considerat com un exemple complex de biocàrst d'acord amb la definició de VILES (1984).

## Agraïments

El present treball és una contribució al projecte de recerca finançat pel Ministerio de Ciencia e Innovación CGL2010-18616/BTE.

## Bibliografia

- BALAGUER, P. (2007): Inventari quantitatiu de les costes rocoses de Mallorca. In: PONS, G.X. & VICENS, D. (ed.). *Geomorfologia Litoral i Quaternari. Homenatge a Joan Cuerva Barceló*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 15: 201-230.
- BÖGLI, A. (1980): *Karst hydrology and physical speleology*. Berlin. Springer.
- BUTZER, K.W. & CUERDA, J. (1962): Coastal stratigraphy of southern Mallorca and its implications for the Pleistocene chronology of the Mediterranean Sea. *Journal of Geology*, 70: 398-416.
- CORBEL, J. (1952): Les lapiaz marins. *Revue Géographique de Lyon*, 37: 379-380.
- CHEN, J.; BLUME, H.P. & BEYER, L. (2000): Weathering of rocks induced by lichen colonization, a review. *Catena*, 39: 121-146.
- DALONGEVILLE, M. (1977). Formes littorales de corrosion dans les roches carbonatées au Liban. Etude morphologique. *Méditerranée*, 3: 21-33.
- DALONGEVILLE, R. & LE CAMPION, TH. (1982): Aperçu sur l'érosion littorale en roches carbonatées. L'exemple de la Méditerranée. *Bull. Lab. Rhod. de Géom.*, 11-12: 3-12.
- DALONGEVILLE, R.; LE CAMPION, TH. & FONTAINE, M.F. (1994): Bilan bioconstruction-biodestruction dans les roches carbonatées en mer Méditerranée: étude expérimentale et implications géomorphologiques. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F.*, 38: 457-474.
- DANIN, A. (1983): Weathering of limestone in Jerusalem by cyanobacteria. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F.*, 27: 413-421.
- DEBRAT, J.M. (1974): Etude d'un karst calcaire littoral méditerranéen. Exemple du littoral de Nice a Menton. *Méditerranée*, 2: 63-85.
- EMERY, K.O. (1946). Marine solution basins. *Journal of Geology*, 54: 209-228.
- FELDMANN, J. & DAVY DE VIRVILLE, A. (1933): Les conditions physiques et la végétation des flaques littorales de la côte des Albères. *Rev. Gén. de Botanique*, 45: 621-654.
- FIOL, L.; FORNÓS, J.J. & GINÉS, A. (1996): Effect of biokarstic processes on the development of solutional rillenkarren in limestone rocks. *Earth Surface Processes and Landforms*, 21: 447-452.
- FOLK, R.L.; ROBERTS, H.H. & MOORE, C.H. (1973): Black phytokarst from Hell, Cayman Islands, British West Indies. *Geological Society of America Bulletin*, 84: 2351-2360.
- FORD, D.C. & LUNDBERG, J.C. (1987): A review of dissolutional rills in limestone and other soluble rocks. *Catena Supplement*, 8: 119-140.
- FORD, D.C. & WILLIAMS, P.W. (1989): *Karst Geomorphology and Hydrology*. Unwin Hyman. London.
- FORNÓS, J.J., BALAGUER, P., GELABERT, B. & GÓMEZ-PUJOL, L. (2005): Pleistocene formation, evolution, retreat rates and processes in carbonate coastal cliff (Mallorca Is., Western Mediterranean). *Journal of Coastal Research. Special Issue.*, 49: 15-21.
- GEHRMANN, C.K.; KRUMBEIN, W.E. & PETERSEN, K. (1992): Endolithic lichens and the corrosion of carbonate rocks, a study of biopitting. *International Journal of Mycology and Lichenology*, 5: 37-48.
- GELABERT, B. (1998): *La Estructura Geológica de la Mitad Occidental de la Isla de Mallorca*. ITGE. Madrid.
- GINÉS, A. (1993): Morfologías exocàrsticas. In ALCOVER, J.A., BALLESTEROS, E. & FORNÓS, J.J. (eds.): *Història natural de l'arxipèlag de Cabrera*: 153-160. CSIC, Societat d'Història Natural, Moll. Palma.
- GINÉS, A. (1999): *Morfologia kàrstica y vegetación en la Serra de Tramuntana. Una aproximación ecológica*. Tesis Doctoral. Departament de Biologia. Universitat de les Illes Balears. Palma.
- GINÉS, J. (2000): *El karst litoral en el levante de Mallorca: una aproximación al conocimiento de su morfogénesis y cronología*. Tesis doctoral. Departament de Ciències de la Terra. Universitat de les Illes Balears.
- GÓMEZ-PUJOL, L. (2006): *Patrons, taxes i formes d'erosió a les costes rocoses carbonatades de Mallorca*. Departament de Ciències de la Terra. Universitat de les Illes Balears.
- GÓMEZ-PUJOL, L. & FORNÓS, J.J. (2001): Les microformes de meteorització del litoral calcari de Mallorca: aproximació a la seva sistematització. *Endins*, 24: 169-185.
- GÓMEZ-PUJOL, L. & FORNÓS, J.J. (2004a): Forma, procesos y zonación en el lapiaz –karren- litoral del sur de Menorca, 1: aproximación morfométrica. In BENITO, G. & Díez HERRERO, A. (eds.): *Contribuciones recientes sobre Geomorfología*: 347-355. Sociedad Española de Geomorfología – Centro superior de Investigaciones Científicas. Madrid.
- GÓMEZ-PUJOL, L. & FORNÓS, J.J. (2004b): Forma, procesos y zonación en el lapiaz –karren- litoral del sur de Menorca, 2: observaciones mediante microscopía electrónica de barrido (SEM). In BENITO, G. & Díez HERRERO, A. (eds.): *Contribuciones recientes sobre Geomorfología*: 357-364. Sociedad Española de Geomorfología – Centro superior de Investigaciones Científicas. Madrid.
- GÓMEZ-PUJOL, L. & FORNÓS, J.J. (2009a): Coastal Karren in the Balearic Islands. In GINÉS, A., KNEZ, M., SLABE, T., DREYBRODT, W. (eds.): *Karst rock features – Karren sculpturing*: 487-502. ZRC Publishing. Ljubljana.
- GÓMEZ-PUJOL, L. & FORNÓS, J.J. (2009b): Microrills. In GINÉS, A., KNEZ, M., SLABE, T., DREYBRODT, W. (eds.): *Karst rock features – Karren sculpturing*: 73-84. ZRC Publishing. Ljubljana.
- GÓMEZ-PUJOL, L.; BALAGUER, P. & FORNÓS, J.J. (2007): El litoral de Mallorca. síntesis geomórfica. In FORNÓS, J.J.; GINÉS, J. & GÓMEZ-PUJOL, L. (eds.): *Geomorfologia Litoral: Migjorn y Llevant de Mallorca*: 17-37. Soc. Hist. Nat. Balears. Palma.
- GÓMEZ-PUJOL, L.; BALAGUER, P.; BALDO, M.; FORNÓS, J.J.; PONS, G.X. & VILLANUEVA, G. (2002a): Patrones y tasas de erosión de *Melaphe neritoides* (Linneo, 1875) en el litoral rocoso de Mallorca: resultados preliminares. In PÉREZ-GONZÁLEZ, A.; VEGAS, J. & MACHADO, M. (eds): *Aportaciones a la Geomorfología de España en el Inicio del Tercer Milenio*: 351-354. ITGME. Madrid.
- GUILCHER, A. (1953): Essai sur la zonation et la distribution des formes littorales de dissolution du calcaire. *Annales de Géographie*, 331: 161-179.
- GUILCHER, A. & PONT, P. (1957) Étude expérimentale de la corrosion littorale des calcaires. *Bull. Assoc. Géogr. Franç.*, 265-266: 48-62.

- JENNINGS, J.N. (1985): *Karst geomorphology*. Blackwell. Oxford.
- JONES, B. (1989): The role of microorganisms in phytokarst development on dolostones and limestones, Grand Cayman, British West Indies. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 26: 2204-2213.
- KELLETAT, D.H. (1980): Formenschatz und prozessgefüge des "Biokarstes" and der küste von Nordost-Mallorca (Cala Guya). *Berliner Geographische Studien*, 7: 99-113.
- KELLETAT, D.H. (1985): Bio-destruktive und bio-konstruktive formelemente an den spanischen mittelmeeerküsten. *Geotekodynamik*, 6: 1-20.
- KELLETAT, D.H. (1997): Mediterranean coastal biogeomorphology: processes, forms and sea levels indicators. *Bulletin de l'Institut Océanographique de Monaco*, 18: 209-225.
- LEY, R.G. (1979): The development of marine karren along the Bristol channels coastline. *Z. Geomorph. N.F. Suppl. Bd.*, 32: 75-89.
- LUNDBERG, J. (2009): Coastal Karren. In GINÉS, A., KNEZ, M., SLABE, T., DREYBRODT, W. (eds.): *Karst rock features - Karren sculpturing*: 249-266. ZRC Publishing. Ljubljana.
- LUNDBERG, J. & LAURITZEN, S.E. (2002): The search for an arctic coastal karren model in Norway and Spitzbergen. In K. HEWITT ET AL. (eds.), *Landscapes of Transition*, 185-203. Kluwer Academic Publishers. Netherlands.
- MAZZANTI, R. & PAREA, G.C. (1979). Erosione della "panchina" sui litorali di Livorno e di Rosignano. *Bolletino Società Geologica Italiana*, 96: 457-489.
- MILLER, W.R. & MASON, T.R. (1994): Erosional features of coastal beachrock and aeolianite outcrops in Natal and Zululand, South Africa. *Journal of Coastal Research*, 10: 374-394.
- MOSES, C.A. (2003): Observations on coastal biokarst, Hells Gate, Lord Howe Island, Australia.. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F.*, 47: 83-100.
- MOSES, C.A. & SMITH, B.J. (1993): A note on the role of the lichen *Collema Auriforma* in solution basin development on a carboniferous limestone substrate. *Earth Surface Processes and Landforms*, 18: 363-368.
- MOSES, C.A. & SMITH, B.J. (1994): Limestone weathering in the supra-tidal zones: an example from Mallorca. In ROBINSON, D.A. & WILLIAMS, R.B.G. (eds.), *Rock weathering and landform evolution*: 433-451. Wiley.
- MYLROIE, J.E. & MYLROIE, J.R. (2009): Coastal eogenetic karren of San Salvador island. In GINÉS, A., KNEZ, M., SLABE, T., DREYBRODT, W. (eds.): *Karst rock features - Karren sculpturing*: 475-486. ZRC Publishing. Ljubljana.
- PALMER, M.; FORNÓS, J.J.; BALAGUER, P.; GÓMEZ-PUJOL, L.; PONS, G. X. & VILLANUEVA, G. (2003): Spatial and seasonal variability of the macro-invertebrate community of a rocky coast in Mallorca (Balearic Islands): implications for bioerosion. *Hydrobiologia*, 501: 13-21.
- PEYROT-CLAUDE, M.; LE CAMPION-ALSUMARD, T.; HARMELIN-VIVIEN, M.; ROMANO, J.D.; CHAZOTTES, V.; PARI, N. & LE CAMPION, J. (1995): La bioérosion dans le cycle des carbonates: essais de quantification des processus en Polynésie française. *Bulletin Société Géologique de France*, 166: 85-94.
- POMAR, L. & WARD, W.C. (1999): Reservoir-scale heterogeneity in depositional packages and diagenetic patterns on a reef-rimmed platform, Upper Miocene, Mallorca, Spain. *American Association of Petroleum Geologist Bulletin*, 83: 1579-1773.
- POMAR, L.; ESTEBAN, M.; LLIMONA, X. & FONTARNAU, R. (1975): Acción de líquenes, algas y hongos en la telodiagénesis de las rocas carbonatadas de la zona litoral preliitoral Catalana. *Instituto de Investigaciones Geológicas de Barcelona*, 30: 83-117.
- POMAR, L.; OBRADOR, A. & WESTPHAL, H. (2002): Sub-wavebase cross-bedded grainstones on a distally steepened carbonate ramp, Upper Miocene, Menorca, Spain. *Sedimentology*, 49: 139-169.
- RIBA, O. (Dir). (1997): *Diccionari de Geologia*. Enciclopèdia Catalana, Institut d'Estudis Catalans. Barcelona.
- ROSSELLÓ, V.M. (1979): Algunas formas kársticas litorales de Mallorca. In BARCELÓ, B. (ed.), *Actas del VI Coloquio de Geografía*: 115-121. AGE. Palma de Mallorca.
- ROSSELLÓ, V.M. (2004): El litoral i les cales. In FORNÓS, J.J., OBRADOR, A. & ROSSELLÓ, V.M. (eds.): *Història Natural del Migjorn de Menorca*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 16: 177-200.
- SANJAUME, E. (1985): *Las Costas Valencianas. Sedimentología y Morfología*. Universitat de València. València. 505 pp.
- SCHNEIDER, J. (1976): Biological and inorganic factors in the destruction of limestone coasts. *Contribution to Sedimentology*, 6: 1-112.
- SERVERA, J. (1999): Principals trets fisiogràfics i climàtics de les Pitiüses. *Territoris*, 2: 9-37.
- SPENCER, T. (1988): Limestone coastal geomorphology: the biological contribution. *Progress in Physical Geography*, 12: 66-101.
- SUNAMURA, T. (1992): *Geomorphology of Rocky Coasts*. Wiley. Chichester.
- TORUNSKI, H. (1979): Biological erosion and its significance for the morphogenesis of limestone coasts and for nearshore sedimentation (Northern Adriatic). *Senckenbergiana Maritima*, 11: 193-265.
- TRUDGILL, S.T. (1976a): The marine erosion of limestone on Aldabra atoll, Indian Ocean. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F. Suppl. Bd.*, 26: 164-200.
- TRUDGILL, S.T. (1979): Spitzkarren on calcarenites, Aldabra Atoll, Indian Ocean. *Zeitschrift für Geomorphologie N.F. Suppl. Bd.*, 32: 67-74.
- TRUDGILL, S.T. (1985): *Limestone Geomorphology*. Longman. London.
- TRUDGILL, S.T. (1987): Bioerosion on intertidal limestone, Co. Clare, Eire — 3: zonation, process and form. *Marine Geology*, 74: 85-89.
- TRUDGILL, S.T.; SMART, P.L.; FRIEDERICH, H. & CRABTREE, R.W. (1987): Bioerosion of intertidal limestone, Co. Clare, Eire — 1: *Paracentrotus lividus*. *Marine Geology*, 74: 85-98.
- TUCCIMEI, P.; GINÉS, J.; DELITALA, C.; GINÉS, A.; GRÀCIA, F.; FORNÓS, J. J. & TADDEUCCI, A. (2006): Last interglacial sea level changes in Mallorca island (Western Mediterranean). High precision U-series data from phreatic overgrowths on speleothems. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 50 (1): 1-21.
- VILES, H.A. (1984): Biokarst: review and prospect. *Progress in Physical Geography*, 8: 523-542.
- VILES, H.A. (1988a): Cyanobacterial and other biological influence on terrestrial limestone weathering on Aldabra: implications for landform development. *Biological Society of Washington Bulletin*, 8: 5-13.
- VILES, H.A. (1988b): Organisms and karst geomorphology. In VILES, H.A. (ed.), *Biogeomorphology*: 319-350. Basil Blackman. Oxford.
- VILES, H.A. (1995): Ecological perspectives on rock surface weathering: towards a conceptual model. *Geomorphology*, 13: 21-35.
- VILES, H.A.; SPENCER, T.; TELEKI, K. & COX, C. (2000): Observations on 16 years of microfloral recolonization from limestone surfaces, Aldabra Atoll, Indian Ocean: Implications for biological weathering. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25: 1355-1370.
- WALTER-LEVY, L.; FRÉCAUT, R. & STRAUSS, R. (1958): Contribution à l'étude de la zone littorale des îles Baléares. Biologie et chimie des algues calcaires. Formes du relief qui leur sont liées. *Revue algologique*, 3: 202-228.
- WENTWORTH, C.K. (1939): Marine bench-forming processes II, solution benching. *Journal of Geomorphology*, 2: 3-25.